

## Determinación del límite distal del delta submarino del río Guadalhorce: Implicaciones morfodinámicas

### *Determination of the distal boundary of the Guadalhorce River submarine delta: Morphodynamic implications*

L.M. Fernández-Salas (1), P. Bárcenas (2), N. López-González (3), F.J.Lobo (4), J. Urbano (1), P. Tuite (1), J. Macías (2), J.T. Vázquez (3) & V. Díaz del Río (3)

- (1) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Cádiz, 11006, Cádiz, Spain.  
E-mail: luismi.fernandez@cd.ieo.es
- (2) Dpto. Analisis matemático, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29080 Málaga, Spain.
- (3) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga, 29640, Fuengirola, Málaga, Spain.
- (4) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-Universidad de Granada), 18100, Armilla, Granada, Spain.

**Abstract:** Clinoforms constitute the basic building elements of continental margin growth. Submarine clinoforms are composed of three geometric elements: topset, foreset and bottomset. This study focuses on the determination of the distal termination of submarine deltaic clinoforms by using morphometric criteria and subsequent validation with stratigraphic, sedimentological and geochemical data. The mechanism and factors that potentially affect bottomset generation are also discussed. These criteria have been applied to the Guadalhorce River prodelta, an environment where advection and along-shore sediment transport prevail. We conclude that the seaward advance of the prodelta is prevented by the current velocity increase at the foot of the morpho-sedimentary feature.

**Key words:** *morphometry, submarine delta, Guadalhorce River, clinoforms, bottomset*

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la dinámica sedimentaria de la plataforma continental permite reconstruir la evolución geológica de la misma y facilita la predicción de su comportamiento futuro, previsiblemente afectado en gran medida por las actividades humanas, tanto en la zona emergida que actúa como fuente de aportes como en la zona marina.

Las porciones submarinas de los deltas se desarrollan a partir de la descarga fluvial de sedimentos terrígenos, pero su crecimiento posterior está modulado por una multiplicidad de factores, tales como la batimetría previa, la naturaleza y cantidad de aporte de sedimentos, la retención de sedimentos en los ambientes estuáricos, la energía hidrodinámica (oleaje y corrientes) y el espacio de acomodación, determinado por la relación relativa entre los cambios del nivel del mar y la subsidencia (Cattaneo *et al.*, 2007; Fagherazzi & Overeem, 2007; Gao *et al.*, 2007). Dichos factores controlan la posición del límite distal y el tipo de perfil transversal de los deltas submarinos, que muestra dos situaciones límite: cóncavo en plataformas dominadas por el oleaje y con poco aporte sedimentario (Niedoroda *et al.*, 2005) y convexo en áreas donde predominan los aportes sedimentarios (Swenson *et al.*, 2005).

La arquitectura sedimentaria de varios sistemas deltaicos Holocenos del margen norte del Mar de Alborán fue relacionada con fluctuaciones del nivel del mar de pequeña escala (p.e., Hernández-Molina, 1993; Fernández-Salas, 2008). Por el contrario, la influencia de las condiciones hidrodinámicas de la plataforma en los procesos y productos sedimentarios submarinos no ha podido ser revelada hasta la fecha.

En este sentido, los proyectos "Estudio de la plataforma continental; ESPACE" en el año 2003, y "Transporte de sedimentos en la plataforma continental de Andalucía oriental: observación multiescalar, modelado y simulación numérica; TESELA" actualmente en ejecución, han generado una base de datos de alta y muy alta resolución del fondo y subfondo marino, lo cual permite abordar el estudio de los procesos sedimentarios que ocurren en el sistema deltaico submarino a escalas temporales de corto período.

En este trabajo se propone una metodología objetiva basada en parámetros morfométricos para la delimitación del límite distal del prodelta del río Guadalhorce, y su posterior validación con variables estratigráficas, sedimentológicas y geoquímicas. Finalmente, se discuten los factores que controlan la posición del límite distal del delta sumergido.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El río Guadalhorce presenta características típicas de los ríos del sureste de la Península Ibérica, con cuencas de drenaje pequeñas y aportes fluviales episódicos y de carácter torrencial. Tiene una cuenca de 3180 km<sup>2</sup> de área, una longitud de 154,2 km y un ratio altura máxima/longitud del río de 0,007. El caudal medio anual es 7,4 m<sup>3</sup>/s y la carga sedimentaria es 2,8 kg/s (Liquete *et al.*, 2005). La plataforma continental frente a la desembocadura del río Guadalhorce muestra una anchura elevada (hasta 12 km) a escala regional.

La energía del oleaje en el Mar de Alborán es baja-moderada, con un 7% de las olas mayores de 1,5 m, que en periodos de temporal pueden alcanzar entre 2 y 3,5 m (Puertos del Estado, 2007). Las direcciones predominantes son del suroeste y de Levante, siendo ésta última la componente menos energética.

El patrón de corrientes dominante en la zona de Málaga muestra dos direcciones, noreste y suroeste, predominando la segunda de ellas, y con una resultante que transporta las masas de agua hacia la costa (Arévalo & García, 1983).

## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos utilizados en este trabajo se han obtenido en los proyectos SPACE y TESELA ejecutados por el Instituto Español de Oceanografía en el área de estudio. Los datos de batimetría y reflectividad usados se han obtenido mediante una ecosonda multihaz Kongsberg-Simrad EM3000D y posteriormente se han procesado obteniéndose un modelo batimétrico de 5x5 m de resolución. Para el análisis morfológico se ha utilizado el software ArcGIS for Desktop v. 10.2.1.

La descripción sedimentológica ha incluido un análisis granulométrico y de los porcentajes de materia orgánica (%MO) y carbonatos (%CaCO<sub>3</sub>) de 58 muestras de sedimento superficial obtenidas con draga shipek a lo largo de toda la plataforma del área de estudio. Se han medido las corrientes superficiales usando una boya de deriva *Coastal Nomad*, en 4 transectos realizados en fechas diferentes, para la descripción de la hidrodinámica de la zona.

El delta sumergido se ha definido como una clinoforma compuesta por tres zonas morfológicamente diferenciadas: a) *topset*: zona proximal más somera con forma aplacerada, b) *foreset*: zona intermedia de mayor pendiente, y c) *bottomset*: zona distal de poca pendiente.

Para la determinación del límite distal del delta submarino o del *bottomset*, se buscó un método objetivo y reproducible basado en medidas morfométricas sobre los datos de la batimetría (Fig.

1). La metodología que se propone está basada en la utilizada en las directrices que propone la comisión de Límites Marinos de la ONU (UN, 1993). Se trata en considerar el límite distal del *bottomset* como el punto donde se produce el máximo cambio de gradiente.

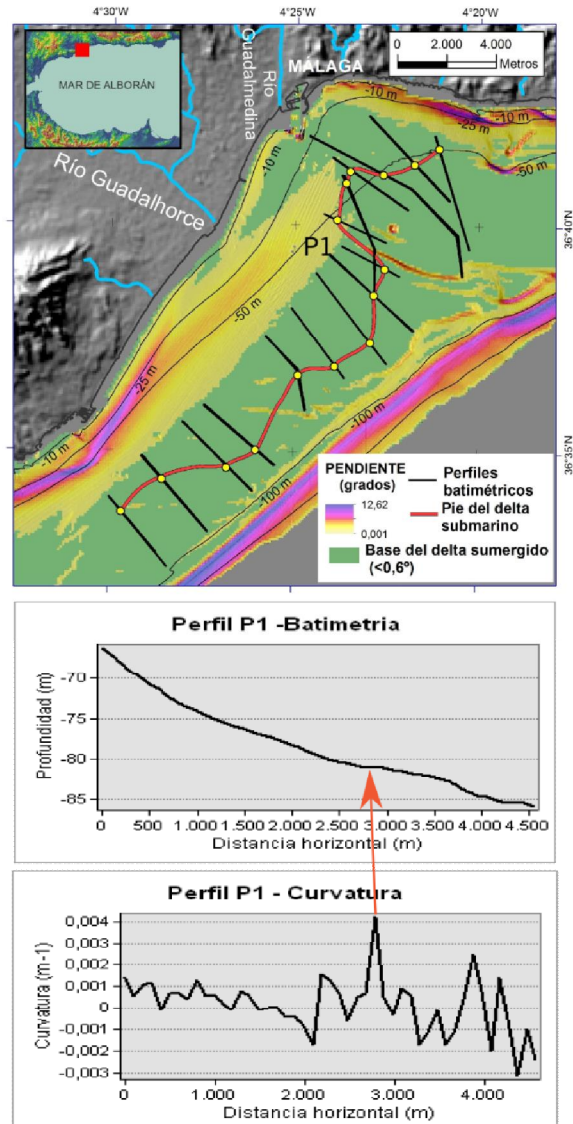


Fig. 1. Mapa de pendientes, donde se marca en verde las pendientes menores a 0,6°. Comparativa de un perfil batimétrico y el correspondiente a la segunda derivada, donde se observa como el máximo cambio de gradiente se corresponde con el límite distal del prodelta.

De esta forma, se ha planificado un método basado en dos fases: A) delimitar los límites de la región de la base del delta, y B) establecer puntos del pie del delta submarino en la zona donde se produzca el máximo cambio de gradiente de la batimetría.

En la fase A, se han determinado los límites de la BOP definiendo un área donde la pendiente sea menor de 0,6°, de forma que englobe aquellas regiones donde el *bottomset* se confunde con otras zonas de la plataforma (Fig. 1).

En la fase B, se ha calculado la segunda derivada de la batimetría usando la herramienta *Curvature*, existente en el módulo *ArcToolBox* de *ArcGis*. Se han realizado perfiles batimétricos y de la segunda derivada a intervalos espaciales más o menos regulares (Fig. 1), siempre perpendiculares a las isóbatas y en la dirección de la pendiente, evitando zonas que no pertenezcan a la BOP. En estos perfiles se han determinado los puntos del FOP donde se produce el máximo valor de la curvatura. La unión de estos puntos permite trazar el límite distal del prodelta.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Determinación del límite distal del prodelta

El límite distal del delta submarino (Fig. 1 y 2) se encuentra entre los 55 m y los 93 m de profundidad, alcanzando la profundidad máxima frente y al suroeste de la desembocadura del río Guadalhorce. Su profundidad media es de 78 m.

La extensión del límite distal desde costa alcanza los 4,6 km en el sur y 4,15 km en el norte. Frente a la desembocadura se extiende 7,6 km. Si las medidas de extensión se realizan de forma radial desde la desembocadura, la máxima extensión ocurre en dirección N-S y la menor en dirección O-E alcanzando 4,86 km.

Su distribución espacial se produce de forma asimétrica con respecto a la desembocadura, favoreciendo su extensión en dirección NE-SO.

### 4.2 Caracterización estratigráfica, sedimentológica, hidrodinámica y de espesor de sedimentos y geoquímica del delta sumergido del Río Guadalhorce

El límite distal del delta sumergido se puede caracterizar con exactitud en función de diferentes variables sedimentológicas (% de grava, arena y fango), hidrodinámica, de espesor de sedimentos y de carácter geoquímico (% en materia orgánica y carbonato) (Fig. 2).

El delta submarino del río Guadalhorce es una clinoforma fangosa de un espesor máximo de 33 m, que se extiende de forma asimétrica con respecto a la desembocadura en dirección suroeste, como se puede observar en el mapa de isopacas (Fig. 2b). Las pendientes son siempre mayores de 0,1°.

Las velocidades de la corriente en superficie medidas en un transecto que se sitúa sobre el límite distal del delta submarino, situado a 75 m de profundidad, oscilan entre 0,07 y 0,77 m/s, con un valor medio de 0,41 m/s, y con dirección predominante hacia el suroeste. Mediante la fórmula  $U(z) = \left(\frac{z}{0,32h}\right)^{1/7} \bar{U}$  para  $0,5 < z < h$ , propuesta por Soulsby (1990), se obtiene la velocidad promedio,  $\bar{U}$ , en la columna de agua a 75 m

de profundidad. Y para obtener la velocidad a 1 m del fondo, se introduce en la fórmula (Soulsby, 1990)

$$U(z) = \left(\frac{z}{0,32h}\right)^{1/7} \bar{U} \quad \text{para } 0 < z < 0,5h, \text{ la velocidad}$$

promedio calculada anteriormente, la profundidad  $h$ , y la altura sobre el fondo,  $z$ . Así, la velocidad a 1 m sobre el fondo es de 0,45 m/s. Según el gráfico de Soulsby (1990) que relaciona velocidad crítica de la corriente y tamaño de grano, una velocidad de 0,45 m/s a un metro del fondo podría mover sedimentos de tamaño inferior a arenas gruesas (~1 mm de diámetro).

En general, los sedimentos del delta submarino se caracterizan por presentar contenidos de gravas inferiores al 5% y de arenas inferiores al 30% (Fig. 2c), siendo el contenido en fango mayor al 70% (Fig. 2d). Esta composición se refleja en la distribución de la reflectividad (Fig. 2a), que suele presentar valores más bajos de -25 dB. El contenido en carbonatos (Fig. 2e) es menor al 20% y la materia orgánica presenta valores entre 6 y 10% (Fig. 2f).

## 5. DISCUSIÓN

La caracterización sedimentológica, geoquímica, acústica, hidrodinámica y de espesor sedimentario (Fig. 2) permite validar el método propuesto para calcular el límite distal del delta submarino del Guadalhorce, ya que el límite morfológico resultante se ajusta a los cambios observados en dichas variables con bastante exactitud.

El delta submarino del Río Guadalhorce se formó durante el Holoceno (Fernández-Salas, 2008) y su estructuración interna refleja la influencia de cambios cíclicos de muy alta frecuencia durante los últimos 6-7 ka. Desde su formación y en todas las etapas diferenciadas por Fernández-Salas *et al.* (2003), la tendencia de crecimiento ha sido hacia el suroeste. Esto implica que los procesos oceanográficos que redistribuyen los sedimentos fluviales son predominantemente longitudinales, aunque se pueden observar morfologías de menor escala (ondulaciones sobre el *foreset*) que evidencian un proceso transversal, al menos de carácter episódico.

El límite distal del delta submarino parece estar controlado por el equilibrio entre el flujo longitudinal dominante y el decrecimiento de los flujos transversales en el delta submarino. El crecimiento de las clinoformas fangosas está limitado energéticamente por las corrientes paralelas a la costa, de forma que la corriente incrementa la energía en el *bottomset*, previniendo que los sedimentos escapen de la región del *foreset*, favoreciendo, por tanto, un transporte lateral del sedimento (Cattaneo *et al.*, 2007). Dicha interpretación puede ser aplicada al área de estudio,



ya que la zona más profunda de la plataforma presenta una reflectividad elevada debido como respuesta a la presencia de sedimentos con un alto contenido en arena y grava, ya que presumiblemente la corriente cercana al fondo es capaz de removilizar aquellos sedimentos de tamaño inferiores a las arenas gruesas. Este transporte lateral resultaría de

una corriente residual que controlaría el crecimiento a largo plazo de la clinoforma; a corto plazo, no obstante, la dinámica sedimentaria puede ser diferente, ya que de hecho se ha comprobado mediante el análisis de imágenes satélite que los sedimentos en suspensión pueden ser transportados más allá del borde de la plataforma.

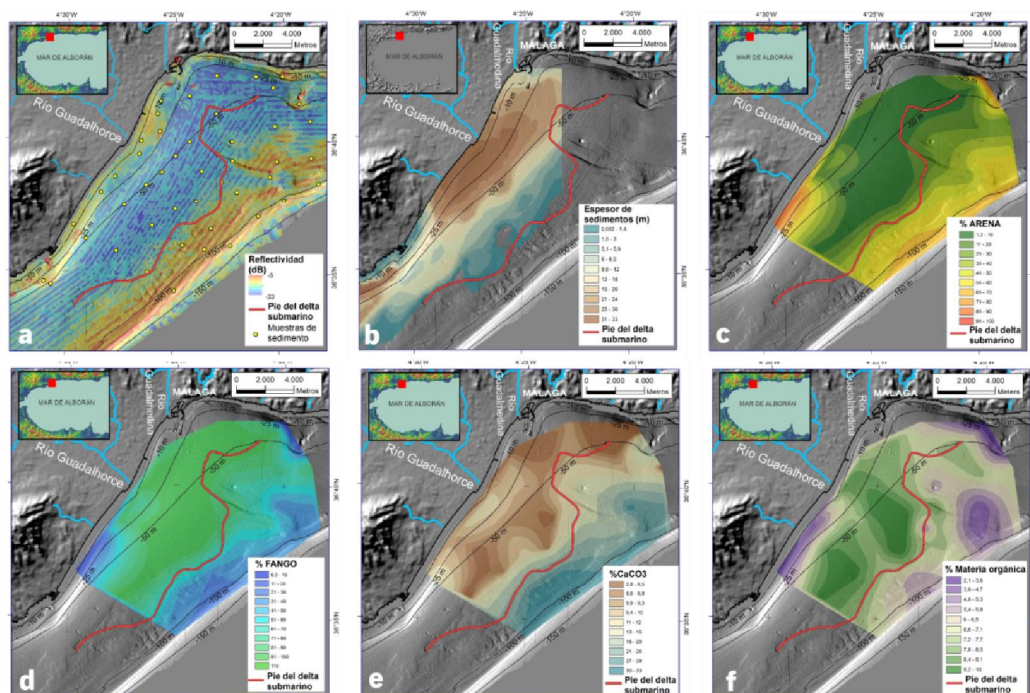


Fig. 2. Distribución espacial de a) Reflectividad y muestras de sedimentos; b) Espesor de sedimentos; c) % Arena; d) % Fango; E) % Carbonatos; F) % Materia orgánica. En todas los mapas se indica el límite distal del delta submarino.

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto de Excelencia Científica TESELA (P11-787 RNM7069). Los datos batimétricos fueron obtenidos en el proyecto ESPACE llevado a cabo por el Instituto Español de Oceanografía y por de la Secretaría General de Pesca Marítima.

## REFERENCIAS

Cattaneo, A., Trincardi, F., Asioli, A. & Correggiari, A. (2007). The Western Adriatic shelf clinoform: energy-limited bottomset. *Continental Shelf Research*, 27, 506-525.

Fagherazzi, S. & Overeem, I. (2007). Models of deltaic and inner continental shelf landform evolution. *Annual Review Earth Planetary Science*, 35, 685-715.

Fernández-Salas, L.M. (2008). Los depósitos del Holoceno Superior en la plataforma continental del sur de la Península Ibérica: Caracterización morfológica y estratigráfica. *Ph. D. Thesis*, Universidad de Cádiz, 277 pp.

Gao, S. (2007). Modeling the growth limit the Changjiang Delta. *Geomorphology*, 85, 225-236.

Hernández-Molina, F.J. (1993). Dinámica sedimentaria y evolución durante el Pleistoceno terminal-Holoceno del margen noroccidental del Mar de Alborán. Modelo de estratigrafía secuencial de muy alta resolución en

plataformas continentales. *Ph. D. Thesis*, Universidad de Granada, 617 pp.

Liquete, C., Arnau, P., Lafuerza, S. & Canals, M., (2005). Mediterranean river systems of Andalusia, southern Spain, and associated deltas: A source to sink approach. *Marine Geology*, 222-223, 471-495.

Niedoroda, A.W., Reed, C.W., Das, H., Fagherazzi, S., Donoghue, J.F. & Cattaneo, A. (2005). Analyses of a large-scale depositional clinoformal wedge along the Italian Adriatic coast. *Marine Geology*, 222-223, 179-192.

Puerto del Estado (2007). Clima Medio del Oleaje. Boya del Mar de Alborán. Conjunto de datos: Redext.

Soulsby, R.L. (1990). Tidal-current boundary layers. In: B. LeMehauté & D.M. Hanes (eds.). *Ocean Engineering Science*. Wiley & Sons, New York, 523-566.

Swenson, J.B., Paola, C., Pratson, L.F., Voller, V.R. & Murray, A.B. (2005). Fluvial and marine controls on combined subaerial and subaqueous delta progradation: morphodynamic modeling of compound-clinoform development. *Journal of Geophysical Research*, 110, F02013.

UN (1993). The Law of the Sea: Definition of the Continental Shelf : an Examination of the Relevant Provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea. *United Nations Publication*, 49 pp.